

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit

Tuomo Tiainen
Materiaalitekniikan professori
Tampereen teknillinen yliopisto (TTY)
Materiaaliopin laitos
PL 589, 33101 Tampere
tuomo.tiainen@tut.fi
040 849 0043

Mikko J. Nieminen
TTY Materiaaliopin laitos

Tomi Lindroos
VTT Uudet materiaalit, Tampere

Tiivistelmä

Kolmivuotinen tutkimushanke toteutettiin TTY:n Materiaaliopin laitoksen, VTT:n Uudet materiaalit- yksikön ja Aalto- yliopiston Valimotekniikan laboratorion (2 ensimmäistä vuotta) yhteistyönä. Tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet integroida avosoluinen metallivaahtorakenne kiväärikaliberisia panssariluoteja vastaan kehitetyssä ballistisessa suojauksessa käytettävään keraami- tai keraamiluonteiseen materiaaliin käyttäen sulapohjaista valmistusreittiä. Toisena tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet käyttää umpisoluista metallivaahtoa tai vaahtoytimistä kerroslevyrakennetta keraamisen tai keraamiluonteisen suojausmateriaalin tausta- eli backing- levynä. Keraamiin integroidun metalliverkon tarkoituksena oli toimia murtumien etenemistä pysäyttävänä elementtinä ja toisaalta sulateitse tapahtuvan valmistuksen kautta luoda keraamiin sitä koossa pitäviä puristusjännityksiä. Hankkeen ensimmäisenä vuonna tutkittiin keraami- metallivaahtoyhdistelmä-materiaalin valmistusta käyttämällä avosoluista polymeerivaahtoa, jonka ympärille tehtiin keraaminen muotti. Polymeerivaahto poistettiin keraamin sisältä polttamalla ennen keraamin lopullista sintrausta ja syntyneen kanaviston infiltrointia sulalla metallilla. Valmistusreitti osoittautui kuitenkin siinä määrin monipolviseksi ja hankalaksi sekä erityislaitteistoa vaativaksi, ettei sitä katsottu teolliseen tuotantoon soveltuvaksi. Keraamiluonteisen suojausmateriaalin taakse liimatulla alumiinivaahtoytimellä kerroslevyrakenteella saatiin alustavissa ampumakokeissa lupauksia herättäviä tuloksia ja VTT kartoitti jatkotutkimuksissa backing- levyksi mahdollisia muita vaahtomateriaaleja. Hankkeen ensimmäisen vuoden kuluessa nousi esille ajatus liittää metallinen backing-levy suojausmateriaalina käytettyyn metallimatriisikomposiittiin suoraan valmistusprosessissa. Toisen hankkevuoden tutkimuksissa saatiin taustalevyn sopivalla pintastrukturoidinnalla syntymään metallurginen liitos komposiitin ja taustalevyn välille. Ampumakokeissa todettiin tällaisen kokonaispaksuudeltaan luokkaa 13 mm olevan yhdistelmä-materiaalin pysäyttävän teräsytimisen panssariluodin siten, että suojausmateriaali pysyi kiinni taustalevyssä ja kokeet antoivat lupauksia yhdistelmä-materiaalin hyvästä moniosumakestävyyydestä. Toisena hankkevuonna testattiin myös eri taustalevymateriaaleja liitoksen muodostumisen ja ampumakokeikäyttyymisen kannalta ja lupaavimmat tulokset saatiin kuumavalssatulla rakenneteräksellä. Kolmantena hankkevuonna karakterisoiittiin syntyneitä liitoksia ja tutkittiin mahdollisuuksia tuottaa suurempia yhdistelmä-materiaalilevyjä joko suoraan valmistusprosessissa tai hitsaamalla laserimenetelmällä pienempiä levyjä suuremmiksi kokonaisuuksiksi siten, että liitos muodostettiin vain taustalevyjen välille komposiitin huonon hitsattavuuden vuoksi. Ampumakokeissa sekä suuremmat yhte-

Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI	Sähköposti	matine@defmin.fi
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI	WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Puhelinvaihe	(09) 16001	Y-tunnus	FI01460105
Pääsihteeri	(09) 160 88310	OVT-tunnus/verkkolaskuosoite	003701460105
		Itellan operaattorivälittäjä-tunnus	003710948874
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314	Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Toimistos sihteeri	050 5555 837	Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244		

näiset yhdistelmämaalilevyt että hitsaamalla kootut samankokoiset levyt osoittivat samaa pysäytyskykyä kuin pienemmät koelevyt sekä hyvää moniosumakestävyyttä. Suojamateriaali rikkoutui vain osamakohdassa ja säröytyi hyvin vähän sen ympäristössä. Sekä yhtenäiseen että hitsaamalla koottuun kooltaan 200 x 200 x 13 mm olevaan yhdistelmämaalilevyyn voitiin ampua useita laukauksia sen menettämättä suojauskykyään.

1. Johdanto

Suojautuminen kiväärikaliberin panssariluoteja vastaan on tärkeää sekä henkilökohtaisen suojauksen osalta että erityisesti panssaroiduissa miehistönkuljetus- ym ajoneuvoissa. Ajoneuvoissa käytettävä raskaampi suojaus perustuu siihen, että suojamateriaalissa on kova, luodin ytimen rikkova kerros ja sen takana pehmeämpi ja sitkeämpi taustalevy (backing), jonka tarkoituksena on pysäyttää luodin sirpaleet. Olemassa olevat ratkaisut perustuvat yleensä keraamiseen pintamateriaaliin, joka kiinnitetään esim liimaamalla metalliseen backing- levyyn. Tällaisen ratkaisun pysäytyskyky yhtä laukausta vastaan on yleensä riittävä, mutta ongelmana on keraamimateriaalin särkyminen ja laaja-alainen irtaaminen taustalevystä iskuenergian ansiosta. Suojausmateriaali menettää tällöin suojauskykynsä seuraavia laukauksia vastaan eli sen ns moniosumakestävyys ei ole tehokkaaseen ja pysyvään suojaukseen riittävä. Tarpeen on siten kehittää ratkaisuja, joiden avulla saadaan periaatteellisella tasolla hyvin toimivien suojausmateriaalien moniosumakestävyyttä merkittävästi parannetuksi. Sekä henkilökohtaisessa suojautumisessa että myös kuljetuskaluston panssaroinnissa käytetyn suojausmateriaalin painolla on ratkaiseva merkitys sen toimivuutta arvioitaessa.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet integroida avosoluinen metallivaahtorakenne kiväärikaliberisia panssariluoteja vastaan tarkoitetussa ballistisessa suojauksessa käytettävään keraami- tai keraamiluonteiseen materiaaliin käyttäen sulapohjaista valmistusreittiä. Toisena tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet käyttää umpisoluista metallivaahtoa tai vaahtoytimistä kerroslevyrakennetta keraamisen tai keraamiluonteisen suojausmateriaalin tausta- eli backing- levynä. Keraamiin integroidun metalliverkon tarkoituksena oli toimia murtumien etenemistä pysäyttävänä elementtinä ja toisaalta sulateitse tapahtuvan valmistuksen kautta luoda keraamiin sitä koossa pitäviä puristusjännityksiä. Vaahtorakenteen käytön eduksi arvioitiin ennen kaikkea vaahtopohjaisten metallimateriaalien keveys umpiaineeseen verrattuna sekä niiden hyvä ja laajalla muodonmuutosalueella toimiva energia- absorptiokyky plastisen muodonmuutoksen yhteydessä.

Tutkimushanke toteutettiin TTY:n Materiaaliopin laitoksen, VTT:n Uudet materiaalit- yksikön ja Aalto- yliopiston Valimotekniikan laboratorion yhteishankkeena siten, että hankkeen koordinoituvastuu oli TTY:n Materiaaliopin laitoksella. Aalto- yliopiston Valimotekniikan laboratorio osallistui hankkeeseen sen kahtena ensimmäisenä vuonna. Yrityspartnereina hankkeessa toimivat Exote Oy (metallimatriisikomposiitin tuottaminen) sekä EOS Finland Oy (lasersintrattujen taustalevyjen valmistaminen).

Tutkimussuunnitelman ensimmäisenä tutkimushaaran oli tarkastella avosoluisen metallivaahtojen ja keraamimateriaalin integrointia yhdistelmämaaliksi siten, että metallivaahto muodostaisi kolmiulotteisen lujiteverkon keraamimateriaalin sisään. Tämä ajateltiin toteutettavaksi siten, että sopivan polymeeripohjaisen avosoluisen vaahtorakenteen ympärille valmistetaan lietevaluperiaatteella keraaminen muotti, joka kuivumisen jälkeen käsitellään ensin korotetussa lämpötilassa polymeerivaahtojen polttamiseksi pois muotin sisältä ja sen jälkeen sintrataan lopulliseen lujuteensa. Polymeerivaahtojen jättämä kanavisto infiltroidaan täyteen sulaa metallia, joka jähmettyessään ja jäähtyessään muodostaa tavoitellun lujiteverkon ja puristusjännitykset keraamimateriaalin sisään.

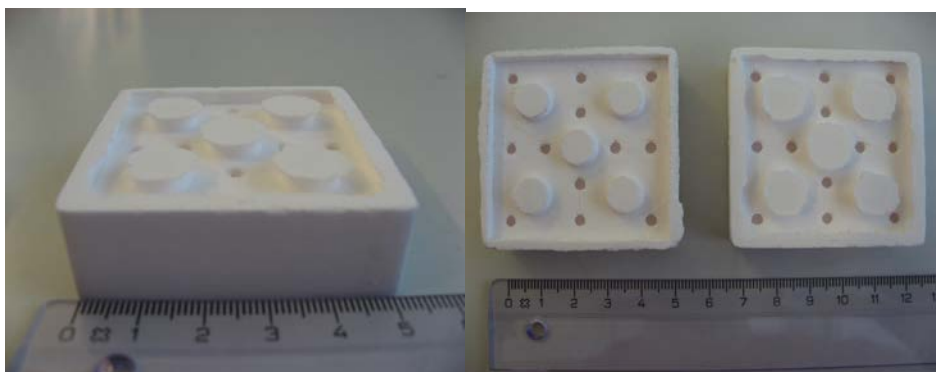
Toisena tutkimushaaran oli selvittää metallivaahtojen tai metallivaahtoytimisten kerroslevyjen käyttöä varsinaisen keraami- tai keraamiluonteisen materiaalin taustalevynä. Ajatuksena oli koota rakenne ainakin alkuvaiheessa liimaamalla ja tutkia sen jälkeen muita mahdollisuuksia taustalevyn liittämiseksi varsinaiseen suojausmateriaaliin. Aikaan saatujen yhdistelmämaterialien toimivuus oli tarkoitus testata ampumakokein käyttäen joko teräsytimisiä tai wolframikarbidiytimisiä kiväärikaliberin panssariluoteja

Hankkeen ensimmäisen vuoden aikana tutkimussuunnitelman kolmanneksi haaraksi nousi ajatus metallisen taustalevyn liittamisestä varsinaiseen suojausmateriaaliin suoraan valmistusprosessin yhteydessä. Tällä tavoin mahdollisesti aikaansaatavan metallurgisen liitoksen arvioitiin toimivan liimaliitosta paremmin ko käyttökohteessa ja tarjoavan liimaliitokseen verrattuna myös muita etuja kuten pitkäaikaiskestävyyden vaikeissakin olosuhteissa sekä mahdollisuuden käyttää hitsausta suojausmateriaalin kiinnittämiseksi suojataviin rakenteisiin.

3. Aineisto ja menetelmät

Hankkeen ensimmäisen tutkimushaaran suojausmateriaaliksi valittiin puhdas keraamimateriaali eli alumiinioksidi ja siihen integroitavaksi lujiteverkoksi teräs. Lujiteverkon generointiin tarvittavana polymeerivaahtona käytettiin kaupallisia avosoluisia materiaaleja. Alumiinioksidijauheesta ja tarvittavista lisäaineista valmistettiin liete. Se kaadettiin muotitiekhikkoon, jonka sisälle polymeerivaahto oli kiinnitetty ja lietteen annettiin kuivua sekä kovettua käsittelylujuuteen saakka. Kovettumisen jälkeen valettu muotti kuivattiin lopullisesti uunissa ja polymeerivaahto poltettiin pois sen sisältä nostamalla lämpötila käytetyn polymeerin hajaantumislämpötilan yläpuolelle. Keraamimuotti sintrattiin lopulliseen lujuuteensa korkeassa lämpötilassa.

Ensimmäisen tutkimushaaran toisena mahdollisuutena selvitettiin keraamimateriaalin taakse sijoitettavan backing-levyn valmistamista ja integroimista keraamimateriaaliin valamalla. Tätä varten valmistettiin Aalto-yliopiston Valimotekniikan laboratoriossa olevalla 3D-tulostimella backing-levyn ja siihen tulevien tartuntojen vahamalleja, joita käyttäen valmistettiin keraamisesta suojausmateriaalista valmistettu "muotti" edellisen kohdan tapaan. Kuva 1 esittää tällaista koekappalemuottia ennen sulan metallin valua muottiin.



Kuva 1. Keraamimuotti, joka on valmistettu metallisen taustalevyn ja keraamisen suojausmateriaalin integroimiseksi valuteitse.

Toisen tutkimushaaran suojausmateriaaliksi valittiin Exote Oy:n valmistama metallimatriisikomposiitti, jonka materiaalipaksuus oli luokkaa 8 mm. Ensimmäisessä vaiheessa backing-levynä käytettiin liimaamalla koottua suljetun huokoisuuden alumiinivaahtoa ydinaineena käyttävää kaupallista kerroslevyä, jonka pintalevyjen paksuus oli yhden millimetrin luokkaa ja koko kerroslevyn paksuus oli 15 mm. Kerroslevy kiinnitettiin paksuudeltaan 8 mm olevan suojausmateriaalin taakse liimaamalla. Tämän tutkimushaaran myöhemmissä vaiheissa VTT tutki myös muunlaisten vaahtorakenteiden kuten syntaktis-

ten vaahtojen mahdollista käyttöä backing- levyinä.

Kolmannessa tutkimushaarassa suojausmateriaalina käytettiin samaa Exote Oy:n valmistamaa materiaalia kuin edellä. Taustalevyinä tutkittiin erilaisia mahdollisuuksia kuten kuuma- ja kylmävalssattua rakenneterästä, karkaistua panssariterästä, austeniittista ruostumatonta terästä, lasersintrattua martensiittista ruostumatonta terästä sekä lasersintrattua maraging- terästä. Liitoksen muodostaminen toteutettiin yhdistelmäateriaalin valmistusprosessin yhteydessä. Alustavissa liitoksokokeissa todettiin nopeasti, että metallurgisen liitoksen muodostamiseksi taustalevyyn tarvitaan sopiva pintastrukturoidi liitoskohtien ydintymisen ja leviämisen helpottamiseksi prosessin aikana. Erilaisia pintastruktuureja valmistettiin sekä lasersintraamalla EOS Finland Oy:n toimesta että koneistamalla. Kokeissa etsittiin sekä optimaalinen taustalevyn materiaali että sen pintastrukturoidi mahdollisimman kattavan metallurgisen liitoksen aikaansaamiseksi. Kolmannen haaran loppuvaiheissa tutkittiin myös valmistettujen yhdistelmäateriaalilevyjen liittämistä toisiinsa suuremmiksi kokonaisuuksiksi laserhitaamalla yhdistelmäateriaalilevyt kiinni toisiinsa pelkästään metallisesta taustalevystä. Laserhitaamisen vaatiman sovitettavuuden saavuttamiseksi liitettävät reunat hiottiin tasohiomakoneella ennen liittämistä. Myös Exote- materiaalin laserhitaamista tutkittiin, mutta sen todettiin aiheuttavan materiaalissa säröilyä.

Valmistetut yhdistelmäateriaalit ja niistä tehdyt koelevyt olivat dimensioiltaan joko 100 x 100 x 13 mm tai tutkimuksen loppuvaiheissa myös 200 x 200 x 13 mm. Ainepaksuudesta noin 8 mm oli Exote- suojausmateriaalia ja loppu pintastrukturoidua terästä. Levyt koeammuttiin tukemalla ne backing- levyn reunoista puukehikkoon ja ampumalla suojausmateriaalin puolelle joko teräs- tai wolframikabidiytimisillä panssariluodeilla. Sekä valmistettujen mutta testaamattomien että koeammuttujen levyjen liitoksia ja materiaalien mikrorakenteita ja ominaisuuksia karakterisoitiin optisen mikroskopian, pyyhkäisy-elektronimikroskopian ja siihen liitetyn mikroanalysoinnin ja kovuusmittausten avulla

4. Tulokset ja pohdinta

Seuraavassa tarkastellaan eri tutkimushaaroissa saatuja tuloksia ja pohditaan niiden merkitystä hankkeen tavoitteiden saavuttamisen kannalta.

4.1 Sulateitse valmistettu (keraami- avosoluinen metallivaahto)- yhdistelmäateriaali

Ensimmäisen tutkimushaaran kohteeksi valittu menettely yhdistelmäateriaalin valmistamiseksi osoittautui teknisesti monipolviseksi ja hankalasti toteutettavaksi. Pääasialliseksi ongelmaksi muodostui keraamisen muotin halkeilu kuivumisen, polymeerivaahtodon poistamisen ja lopullisen sintrauksen yhteydessä. Tämä saatiin eliminoiduksi käyttämällä sopivia lisäaineita keraamisen lietteen valmistuksessa. Seuraavaksi ongelmaksi osoittautui sulan metallin infiltrointi keraamisen muotin kanavistoon, joka ei onnistunut sulan metallin ja keraamimuotin välisen huonon kostutuksen vuoksi. Tilannetta yritettiin parantaa käyttämällä metallimateriaalina kovajuotetta ja kostutuksen parantamiseksi sille soveltuvaa juoksutetta. Merkittävää parannusta ei kostutukseen ja infiltroitumiseen kuitenkaan tälläkään tavalla saavutettu. Hyvän kostutuksen aikaansaaminen olisi edellyttänyt vakuumiuunin ja paineavusteisen infiltroinnin käyttöä, mutta tällaista laitteistoa ei ollut käytettävissä. Tämän tutkimushaaran osalta ei tutkimuksia katsottu tarpeelliseksi jatkaa.

4.2. Vaahtorakenteinen backing- levy

Toisen tutkimushaaran ensimmäisissä ampumakokeissa suojausmateriaalin backing- levynä toimi liimaamalla koottu, kokonaispaksuudeltaan 15 mm oleva, alumiinisista pinta-levyistä ja suljetun huokoisuuden alumiinivaahtoytimeistä koostuva kerroslevy. Tällä ra-

kenteella saatiin teräsytiminen panssariluoti pysähtymään satunnaisesti, mutta ei aina. Pysähtyneen luodin aiheuttama pullistuma oli melko suuri. Kuva 2 esittää tällaista koeammuttua materiaalilevyä, jossa on sekä pysähtyneen että läpäisseen luodin iskemä.



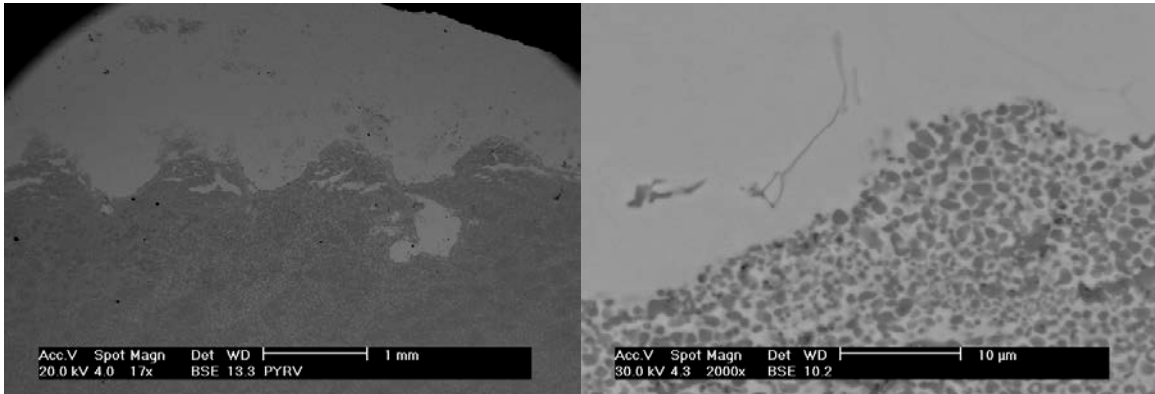
Kuva 2. Ampumakokeessa testattu Exote- materiaalin (kuvan alaosassa kuvakentän ulkopuolella) ja alumiinivaahtoytimisen kerroslevyrakenteen yhdistelmä. Sekä ensimmäinen läpäissyt että toinen pysähtynyt osuma nähtävissä.

Saatuja tuloksia pidettiin kuitenkin siinä määrin rohkaisevina, että tätä tutkimushaaraa kartoitettiin eteenpäin VTT:n toimesta sen jälkeen, kun tutkimus oli suuntautunut kolmanteen tutkimushaaraan eli backing- levyn liittämiseen suojausmateriaaliin metallimatriisikomposiitin ja yhdistelmämaterialin valmistusprosessin yhteydessä. Tavoitteena oli saada syntymään alumiinipohjainen vaahtolevy backing- rakenteeksi käyttäen keveitä täyteaineita (ns syntaktinen vaahtorakenne). Täyteaineena käytettiin sekä Leca- soraa että mikrolasipalloja. Vaahtorakennetta ei kuitenkaan saatu syntymään, koska Leca-sora ei kestänyt prosessin loppuvaiheen toimenpiteitä. Mikrolasipalloja käyttäen saatiin vaahtorakennetta syntymään, mutta metallurgista liitosta ei suojausmateriaalin ja tämän vaahtorakenteen välille syntynyt ilman vaahtorakenteen turmeltumista ja backing-levyyn muodostuneita paksuusvaihteluja. Vaikka syntaktisten vaahtojen valmistus backing- levyksi vaikutti kohtuullisen potentiaaliselta vaihtoehdolta kevyen ja jäykän backing-levyn muodostamiseksi yhdistelmämaterialin valmistusprosessin yhteydessä, päätettiin jatko-tutkimuksissa kuitenkin keskittyä esille nousseeseen kolmanteen tutkimushaaraan.

4.3 Valmistusprosessissa tapahtuva suojausmateriaalin ja backing- levyn integrointi; pintastrukturointi ja materiaaliveitohdot

Kolmannen tutkimushaaran alustavissa liitoskokeissa todettiin, että tavoiteltua metallurgista liitosta ei suojausmateriaalin ja backing- levyn välille saatu syntymään backing- levyn pinnan ollessa sileä. Seuraavaksi liitoksen aikaansaamiseksi testattiin backing- levyn eri tavoin toteutettua pintastrukturointia. Tällä tavalla saatiin tavoiteltu metallurginen liitos syntymään Exote- materiaalin ja rakenneteräslevyjen (joko kuumavalssattu tai kylmävalssattu teräs) välille. Kuva 3 esittää yhdellä tutkitulla pintastruktuurilla aikaansaattua metallurgista liitosta. Ensimmäisissä kokeissa liitokset muodostuivat hyvinä vain levyjen kulmiin ja reunoille, mutta pintastruktuurin ja valmistusparametrien optimoinnilla päästiin tilanteeseen, jossa liitos saatiin muodostumaan koko rakenneteräslevyn alueelle. Hyvän liitoksen syntyessä myös yhdistelmämaterialilevy pysyi kohtuullisen suorana prosessin kestäessä.

Seuraavaksi tutkittiin erilaisten materiaalien käyttöä yhdistelmämaterialin backing- levynä. TTY:n kokeissa testattiin karkaistua Ramor- panssariterästä, lasersintrattua martensiittista ruostumatonta terästä, austeniittista ruostumatonta terästä sekä lasersint-

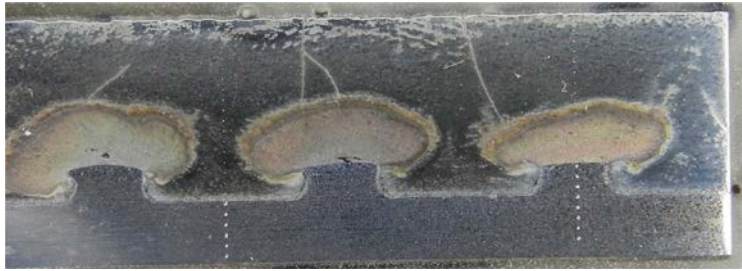


Kuva 3. Yhdellä taustalevyn pintastrukturointityypillä aikaansaatu metallurginen liitos metallimatriisikomposiitin (kuvan alaosa) ja kylmävalssatun rakenneteräslevyn välillä.

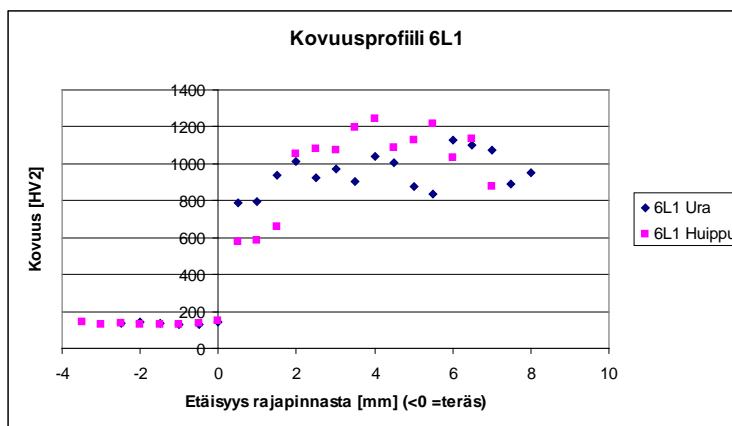
rattua maraging- terästä. Maraging- teräksen tapauksessa tutkittiin myös pintastrukturointia, jonka avulla saatiin aikaan muodonmuutosrajoitusta kahdessa levyn tasossa olevassa suunnassa. VTT:n tutkimuksissa keskityttiin selvittämään metallurgisen liitoksen syntymistä titaanista valmistetun ja sopivasti strukturoidun taustalevyn ja Exoten välille. Tutkimus- ja kehitystyön tuloksena saatiin metallurginen liitos syntymään Exote-materiaalin ja rakenneterästen, panssariteräksen, martensiittisen ruostumattoman teräksen ja maraging- teräksen välille. Liitos saatiin muodostumaan myös titaanin ja Exote-materiaalin välille. Tässäkin tapauksessa titaanilevyn pintastrukturointi ennen valmistusprosessia paransi merkittävästi liitoksen muodostumista ja lujuutta. Austeniittisen ruostumattoman teräksen tapauksessa materiaaliominaisuuksien voimakas ero sai aikaan muodostuneen liitoksen osittaisen repeämisen valmistusprosessin aikana ja yhdistelmä-materiaalilevyn voimakkaan käyristymisen.

4.4 Mikrorakennetutkimukset ja kovuusmittaukset

Syntyneitä liitoksia karakterisoitiin optisen ja elektronimikroskopian sekä elektronimikroskopiaan liitetyn mikroanalysoinnin avulla. Liitoksista mitattiin myös kovuusjakaumia liitospintojen yli mahdollisten rakennemuutosten toteamiseksi ja niiden vaikutusten arvioimiseksi. Mikrorakennetutkimuksissa todettiin, että karkaistun panssariteräksen mikrorakenne muuttui valmistusprosessin vaikutuksesta ja menetti muutoksen myötä kovuuttaan sekä myös osan sitkeyttään. Ferriittis-perliittiset rakenneteräkset (sekä kuuma- että kylmävalssatut) säilyivät mikrorakenteeltaan ferriittis-perliittisinä eikä merkittäviä ominaisuusmuutoksia havaittu. Kylmävalssattu rakenneteräs tosin menetti hiukan kovuuttaan prosessin seurauksena (keskimäärin 160 HV2 ennen prosessia ja 120 HV2 sen jälkeen) ja kuumavalssatun teräksen raekoko kasvoi jonkin verran. Austeniittisessä ja martensiittisessä ruostumattomassa teräksessä ei havaittu merkittäviä rakenne- tai ominaisuusmuutoksia. Mikroanalysoinnin avulla todettiin, että valmistusprosessin aikana kulkeutui rautaa teräksestä Exote- materiaalin puolelle (kuva 4). Tämä tapahtui pintastrukturoinnin harjakohdissa; urien pohjissa ei diffuusiota tapahtunut. Exote- materiaalin ainesosien ei havaittu prosessin aikana vaeltaneen teräksen puolelle. Kovuusmittauksissa todettiin Exote- materiaalin kovuuden laskeneen materiaalin keskimääräisestä kovuudesta (noin 1000-1200 HV2- yksikköä) arvoon noin 600-800 HV2- yksikköä rajapinnassa ja kohoavan siitä noin 2 mm:n matkalla Exote- materiaalin keskimääräiseen kovuuteen. Teräksen puolella liitoksen kovuusjakauma oli kaikissa tutkituissa tapauksissa tasainen perusmateriaalin kovuuden pysyessä samana liitoksen rajapintaan asti (kuva 5). Exote-



Kuva 4. Exote-levyn ja rakenneterästaustalevyn välinen metallurginen liitos, jossa rautapitoinen vyöhyke Exote-materiaalissa on saatu näkyviin syövyttämällä.



Kuva 5. Esimerkki Exote-materiaalin (kuvan oikea puoli) ja rakenneteräksen (kuvan vasen puoli) välisen metallurgisen liitoksen kovuusjakaumista.

perusmateriaalille mitatut kovuudet yhdistelmämaterialinäytteissä olivat jonkin verran ko materiaalille luonteenomaisten kovuusarvojen (noin 1400 HV2) alapuolella. Tämä saattaa johtua prosessissa olleen ”ylimääräisen” backing-levyn vaikutuksesta.

4.5. Hitsauskokeet suurempien yhdistelmämaterialipintojen valmistamiseksi

Tutkimuksissa haluttiin selvittää myös mahdollisuudet liittää valmistuskokeissa tuotettuja kooltaan 100 x 100 mm olevia yhdistelmämaterialilevyjä (backing-levynä kuumavalsattu rakenneteräs) suuremmiksi suojauspinoiksi hitsaamalla koelevyt kiinni toisiinsa pelkästään niiden backing-levyistä laserhitsausmenetelmällä. Kokeiden tuloksena voitiin osoittaa, että yhdistelmämateriali kesti hitsauksen aiheuttaman lämpösyklin ilman suojausmateriaalin ja backing-levyn välisen liitoksen vaurioitumista. Liitoksen hitsaamista myös Exote-materiaalin puolelta kokeiltiin ja liitos saatiin muodostetuksi, mutta hitsauksen todettiin aiheuttavan mikrosäröjen muodostumista sekä itse liitokseen että sen viereiseen perusaineeseen. Pelkästään backing-levystä hitsaten koottu 200 x 200 mm näytelevy (koottu neljästä pienemmästä levyistä) asetettiin ampumakokeeseen liitosten kestävyyden selvittämiseksi.

4.6 Ampumakokeet ja niiden tulokset

Ampumakokeissa käytettiin pääasiassa teräsytimisiä Nato P80 AP-luoteja. Myös wolframikarbiditytimisiä luoteja käytettiin lähinnä potentiaalisimmiksi arvioitujen materiaalien testaamisessa.

Näytekooltaan 100 x 100 mm olevat Exote/rakenneteräslevyt, joihin saatiin muodostumaan koko liitospinnan kattava metallurginen liitos, pysäyttivät teräsytimisen luodin siten, että yhdistelmämaterialilevy säilyi ehjänä ja vain lievästi säröytynyt suojausmateri-

aali pysyi kiinni taustalevyssä (kuva 6). Myös taustalevyyn syntynyt pullistuma oli varsin pieni. Tämä antoi viitteitä hyvästä moniosumakestävydestä. Käytettäessä backing-levynä austeniittista ruostumatonta terästä teräsytiminen luoti kyllä pysähtyi, mutta jo valmistusprosessin jälkeen osittain irti olleen liitospinnan ansiosta suojausmateriaali irtosi backing-levystä eikä moniosumakestävyttä saavutettu. Myös taustalevyyn syntynyt pullistuma oli suuri. Lasersintratun martensiittisen ruostumattoman teräksen tapauksessa tulos oli samankaltainen, joskin parempi liitos sai aikaan suojausmateriaalin osittaisen kiinnipysymisen backing-levyissä. Karkaistua panssariterästä backing-levynä käyttäen valmistetun yhdistelmämaterialin teräsytiminen panssariluoti lävisti hyvästä liitoksesta huolimatta, koska panssariteräs murtui hauraasti luodin iskusta yhdistelmämaterialin

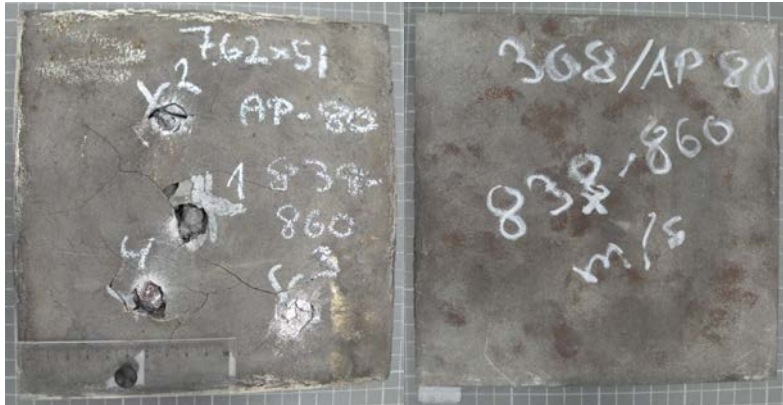


Kuva 6. Ampumakokeessa yhdistelmämaterialiin pysähtynyt teräsytiminen panssariluoti.

valmistusprosessissa läpikäymiensä rakennemuutosten ansiosta.

VTT:n valmistama titaanisen backing-levyn yhdistelmämateriali ei pysäyttänyt teräsytimistä luotia, kun titaanilevyn paksuus oli 2 mm ja liitos valmistettiin ilman titaanin pintastrukturoidintia. Exote-materiaali myös irtosi kauttaaltaan taustalevystä. Kun titaanilevyn paksuutta kasvatettiin arvoon 5,5 mm (rakenteen neliömetripaino noin 60 kg/m²) ja käytettiin edeltävää pintastrukturoidintia, yhdistelmämateriali pysäytti teräsytimisen luodin, mutta Exote-materiaali irtosi edelleen backing-levystä. Tarkemmissa tarkasteluissa todettiin kuitenkin Exoten murtuneen irtoamisvaiheessa perusaineen puolelta ja titaanilevyn pinnassa olevan suuria alueita, joissa Exote on edelleen kiinni titaanilevyssä. Siten syntynyt liitos on varsin luja ja tämä yhdistelmämateriali kaikkineen lupauksia herättävä.

Moniosumakestävyden varmistamiseksi ja hitsatun rakenteen hitsausseamojen kestävyden tutkimiseksi valmistettiin suurempikokoisia rakenneterästaustaisia yhdistelmämaterialilevyjä kooltaan 200 x 200 mm sekä samankokoinen, neljästä pienemmästä (koko 100 x 100 mm) yhdistelmämaterialilevystä pelkästään backing-levyistä yhteenhitsattu testikappale. Testilevyt koeammuttiin käyttäen Nato P80 AP-luoteja siten, että yhtenäiseen levyyn ammuttiin ensin yksi laukaus keskelle ja sen jälkeen kolme laukausta levyn eri kulmiin (kuva 7). Hitsaamalla kootussa koelevyissä ammuttiin ensin kaksi laukausta kahden pienemmän levyn keskelle ja sen jälkeen kolmas laukaus kolmannen levyn reunaan n 30 mm päähän hitsausseamasta (kuva 8).



Kuva 7. Kooltaan 200x200 mm olevaan yhdistelmäateriaaliin teräsytimisellä panssari-
luodilla ammutut neljä koelaukausta kuvattuna sekä Exote- materiaalin (kuvan vasen
puoli) että backing- levyn (kuvan oikea puoli) puolelta

Kuvista 7 ja 8 nähdään, että valmistetulla yhdistelmäateriaalilla on erinomainen mo-
niosumakestävyys. Kaikki ammutut luodit ovat pysähtyneet levyyn ja muodostuneet pul-
listumat ovat varsin pieniä (kuva 8). Exote- materiaali on säröytynyt vain vähän ja pysy-
nyt kauttaaltaan kiinni backing- levyssä pullistumakohdan aluetta lukuunottamatta. Hit-
satussa rakenteessa kaikki taustasaumat ovat ehjiä myös liitoksen lähelle osuneen luodin
tapauksessa. Ammuttaessa hitsattuun koelevyyn aivan levyjen välisen liitoskohdan vie-
reen tai sen keskelle teräsytiminen luoti lävisti testilevyn, koska Exote- materiaali lohkesi
levyn reunasta eikä hitsaussauman lujuus enää riittänyt kantamaan siihen kohdistuvaa
suurempaa kuormaa epäsymmetriseksi ja vajaaksi muodostuneen iskemäkartion vuoksi.
Tässä on huomattava, että pintastrukturoidin vuoksi taustalevyn ainepaksuus ja samalla
liitospaksuus olivat ohuimmillaan vain noin 2 mm luokkaa.

Mikään edellä kuvatuista yhdistelmäateriaaleista ei vielä pysäyttänyt wolframikarbi-
diytimistä panssariluotia. Lähimpänä pysähtymistilannetta arvioitiin olevan rakenneteräs-
tä backing- levynä käyttäneiden yhdistelmien.



Kuva 8. Neljästä pienemmästä yhdistelmäateriaalilevystä backing- levyt hitsaamalla
koottuun testilevyyn teräsytimisellä panssari-
luodilla ammutut kolme koelaukausta sekä
Exote- materiaalin (kuvan vasen puoli) että backing- levyn puolelta kuvattuna

5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli parantaa nykyisten metalli-keräämpohjaisten yhdistelmäma-
teriaalien suojauskykyä ja ennen kaikkea moniosumakestävyyttä integroimalla keraami-
materiaaliin metallivaahtopohjaisia rakenteita tai käyttämällä vaahtorakenteita keraami-
luonteisen suojausmateriaalin backing- levynä. Johtoryhmän sisällä käydyissä keskuste-
luissa tavoitteeksi pelkistettiin wolframikarbidiytimisen panssariluodin pysäyttäminen
moniosumakestävästi yhdistelmämaateriaalilla, jonka neliömetripaino olisi 65 kg/m².
Hankkeen kestäessä tutkimuksen kohteeksi valikoitui metallisen backing- levyn liittämi-
nen suojausmateriaalina toimivaan metallimatriisikomposiittiin metallurgisella liitoksella
komposiittimateriaalin valmistusprosessin yhteydessä. Backing- levyn sopivalla pinta-
strukturoidinnalla tämä saatiin onnistumaan erittäin hyvin siten, että metallurginen liitos
muodostui taustalevyn ja komposiittimateriaalin välille koko liitospinnan kattavana.
Hankkeessa kartoitettiin myös eri taustalevymateriaalien toimivuutta liitoksen muodos-
tumisen ja yhdistelmämaateriaalin suojauskyvyn kannalta ja kuumavälissäni niukkahilli-
nen rakenneteräs todettiin tässä yhteydessä parhaiten toimivaksi. Myös titaanilla saatiin
varsin lupaavia tuloksia.

Tällä tavoin valmistetun yhdistelmämaateriaalin kokonaisainepaksuus oli noin 13 mm ja
siitä suojausmateriaalina toimivan metallimatriisikomposiitin osuus oli noin 8 mm. Kysei-
sen yhdistelmämaateriaalin neliömetripaino oli rakenneterästä olevan backing- levyn tapa-
uksessa noin 72 kg/m² ja titaanisen taustalevyn tapauksessa noin 60 kg/m². Rakennete-
räksisen backing- levyn yhdistelmämaateriaali kykeni pysäyttämään teräsytimisen panssa-
riluodin siten, että taustalevyn pullistuma pysyi kohtuullisena ja materiaalin moniosuma-
kestävyys oli erittäin hyvä. Testikappaleilla, jotka oli valmistettu pienemmistä koelevyistä
hitsaamalla rakenneteräksiset backing-levyt kiinni toisiinsa, saavutettiin sama pysäytys-
kyky ja moniosumakestävyys kuin samankokoisella yhtenäisellä levyllä lukuunottamatta
aivan liitoskohdan viereen tai sen keskelle tulleita osumia. Hitsausliitokset kestivät hyvin
yli kolmen sentin päähän liitoksesta osuneiden ja materiaaliin pysähtyneiden luotien is-
kut. Titaanitaustalevyn tapauksessa teräsytiminen luoti pysähtyi, mutta testilevyn metal-
limatriisikomposiitti irtosi komposiitissa etenevän murtuman vuoksi kauttaaltaan tausta-
levystä eikä moniosumakestävyyttä ollut. Wolframikarbidiytimistä panssariluotia ei saatu
pysähtymään yllä kuvatulla yhdistelmämaateriaalilla missään tutkituista tapauksista.

Tutkimukselle asetettuja tavoitteita kehitettävän suojausmateriaalin pysäytyskyvyn suh-
teen ei täysin saavutettu. Teräsytimisen panssariluodin kohdalla rakenneteräksestä val-
mistetulla backing- taustalla varustetun yhdistelmämaateriaalin pysäytyskyky on kuitenkin
lähes sataprosenttinen myös hitsaamalla kootulla rakenteella ja moniosumakestävyys
erinomainen. Materiaalin neliömetripaino on hyvin lähellä tavoitearvoa. Kehitetystä yhdis-
telmämaateriaalista on myös mahdollista valmistaa hyvän suojauskyvyn ja moniosuma-
kestävyyden omaavia suurempia suojauspintoja liittämällä yhdistelmämaateriaalilevyjä
toisiinsa hitsaamalla backing- levyt kiinni toisiinsa esim laserimenetelmällä. On hyvin
mahdollista, että ko materiaalista valmistetut suuremmat komponentit voivat toimia suo-
jausvaikutuksen lisäksi myös kantavina rakenneosina esim ajoneuvoissa, joskin tämän
varmistaminen vaatii vielä lisätutkimuksia.

Lisätutkimuksia tarvitaan vielä ainakin kolmella rintamalla:

- a) yhdistelmämaateriaalin suojauskyvyn parantaminen. Tämä voidaan saavuttaa Exote-
materiaalin kovuutta lisäämällä. Tällä toimenpiteellä voisi tulla mahdolliseksi myös
wolframikarbidiytimisen luodin pysäyttäminen nykyisillä tai jopa vähän pienemmillä
neliömetripainoilla.
- b) hitsattujen rakenteiden kestävyiden parantaminen raon kohtaan osuvan luodin iskua
vastaan. Tämä voitaneen saavuttaa infiltroimalla metallimatriisikomposiittilevyjen ra-
japinnoille jäävät raot esim sopivalla epoksilla. Kestävyttä voitaisiin parantaa myös



kehittämällä backing- levyn pintastrukturoida siten, että hitsausaumasta tulee aina teräslevyn täysimääräisen paksuuden syvyinen.

- c) yhdistelmäateriaalin käyttömahdollisuuksien selvittäminen kantavina rakenneosina esim ajoneuvoissa. Tämä mahdollistaisi rakenteiden keventämisen siten, että hitsaamalla yhdistelmäateriaalilevyistä koottu suojausmateriaalipinta kiinnitettäisiin ikinään hitsaamalla sopivaan tukikehikkoon yhtenäisen korirakenteen aikaansaamiseksi. Selvitettävä asia on, miten yhdistelmäateriaalin moniosumakestävyys käyttäytyy suurempina reunoilta tuettuina pintoina ja mikä on rakenteen elastisen jouston merkitys luodin iskuenergian absorboinnissa.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

1. T. Tiainen ja Mikko J. Nieminen: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit, MATINE- loppuraportti 18.09.2009
2. Tomi Lindroos: MATINE-METVA, VTT:n osahankkeen loppuraportti 18.09.2009
3. Mikko J. Nieminen ja Tuomo Tiainen: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit, osa II, väliraportit:
 1. väliraportti ajalta 1.1.2010-31.3.2010 sekä täydennys ajalle 1.4.-15.6.2010
 2. väliraportti ajalta 1.4.2010 – 31.8.2010
 3. väliraportti ajalta 1.9.2010-26.11.2010
4. Mikko J. Nieminen ja Tuomo Tiainen: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit, MATINE tutkimusseminaarisesitelmä, Pääesikunta 17.11.2010
5. Tomi Lindroos: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit 2010, VTT osaraportti 26.11.2010
6. Mikko. J. Nieminen ja Tuomo Tiainen: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit, osa III, väliraportit:
 1. väliraportti ajalta 29.11.2010-31.5.2011
 2. väliraportti ajalta 1.6.2011-15.11.2011
7. Mikko J. Nieminen ja Tuomo Tiainen: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit, osa III, MATINE tutkimusseminaarisesitelmä, Säätytalo 17.11.2011
8. Tomi Lindroos: Metallivaahtolujitteiset ballistiset suojausmateriaalit, VTT tutkimusraportti VTT-R-08564-11, 29.11.2011.

7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Kotimaisen panssarikeraamin eli SHS-keraamin kehittäminen alkoi jo vuosia sitten MATINE-rahoituksen turvin. Näissä kolmessa viimeisessä hankkeessa on jo keskitytty keraamin ja sen tarvitseman taustarakenteen kehittelyyn. Ensimmäisessä vaiheessa yritettiin soveltaa suoraan lähdetietoa, että taustan on oltava jäykkä ja kevyt. Yhdistelmä SHS-keraami ja metallivaahtobacking ei kuitenkaan toiminut toivotulla tavalla. Sen sijaan keraamin yhdistäminen samassa valmistusprosessissa suoraan metalliseen taustalevyyn tuntui lupaavalta ja hanke saikin aivan uuden suunnan.

Ennako-odotuksista huolimatta rakenneterästausta toimi parhaiten. Tämä toi lisäksi mukanaan merkittävän edun- kokonaisrakente voidaan liittää muuhun teräsrakenteeseen hitsaamalla . Keraamihan liitetään taustaan normaalisti liimatun tai ruuviliitoksin. Hank-



keessa syntynyt metallin ja keraamin välinen metallurginen sidos osoittautui niin lujaksi, että levyt eivät irronneet toisistaan edes moniosuma-ampumakokeessa. Tässä vaiheessa syntyi myös kotimaisen terästeollisuuden kiinnostus asiaan, koska tarvittava tausta ja siihen soveltuva pintastruktuuri voidaan valmistaa valssausmenetelmällä. Kansainvälinen kiinnostus tuloksiin on tällä hetkellä myös melkoinen.

MATINEN kannalta katsottuna koko SHS-keraamin synty ja sen jatkokehitykset ovat suuresti MATINEN ansiota. MATINELLA oli rohkeutta tukea alkuvaiheessaan täysin tuntematonta aluetta. Hankkeen myötä on Suomeen syntynyt myös joukko osaavia ballistiikan tutkijoita.

Vuoden 2012 hanke keskittyy kokonaan taustan pintastruktuurin ja siihen parhaiten soveltuvan teräslaadun etsimiseen. Tämän vaiheen jälkeen hanke on kypsä siirtymään muuhun rahoitusympäristöön.

Tutkimusalojohtaja TKI Jukka Merikoski PVTT, MT-jaoston sihteeri